磁氮耦合对膜下滴灌加工番茄产量及水肥利用效率的影响

马怡璠[1,2,3]， 吕德生[1,2,3]， 王振华[1,2,3]， 李燕强[1,2,3]，
刘 健[1,2,3]， 温 越[1,2,3]， 朱艳[1,2,3]

（1. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832000；2. 现代节水灌溉兵团重点实验室，新疆 石河子 832000；3. 农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室，新疆 石河子 832000）

摘　要：为探究适合膜下滴灌加工番茄的磁化水施肥制度，本研究以产量和水肥利用效率为目标，设置4个磁化水强度0 Gs（M0）、2000 Gs（M1）、3000 Gs（M2）、4000 Gs（M3）和3个施氮量水平200 kg N·hm^{-2}（N1）、250 kg N·hm^{-2}（N2）和300 kg N·hm^{-2}（N3），采用裂区试验设计，进行田间试验。通过监测加工番茄生育期内的土壤含水率、株高、茎粗及地上部生物量，并结合最终产量指标，探究各磁氮组合对加工番茄水肥利用效率的影响。结果表明：磁化水滴灌显著提高了加工番茄的土壤含水率，增加了土壤储水量，磁氮耦合显著提升了20~40 cm土层土壤含水率。磁化水强度在2270~3678 Gs，施氮量220~230 kg·hm^{-2}时，可促进加工番茄生长，磁化强度大于4000 Gs且施氮量超过250 kg·hm^{-2}时，不能进一步提高加工番茄的生长。随磁化强度的增加，加工番茄产量及水肥利用效率呈先增后减的变化，施氮量的增加，会提高产量和水分利用效率，但会降低氮肥偏生产力。其中，M2N3处理的产量和水分利用效率最大，为169.67 t·hm^{-2}和35.61 kg·m^{-3}，M2N1处理的氮肥偏生产力最大，为822.54 kg·kg^{-1}。运用回归分析并结合空间分析的方法，综合考虑得到产量、水分利用效率和氮肥偏生产力三者取得较大值时的磁氮区间为2270~3678 Gs和220~230 kg N·hm^{-2}。本研究可为新疆加工番茄科学应用磁化水和氮肥提供理论支撑，为优化磁氮组合配置以提升加工番茄产量提供科学指导。

关键词：膜下滴灌；磁氮耦合；产量；水肥利用效率；空间分析；加工番茄

新疆作为中国最大的加工番茄生产基地，多年平均种植面积为46667×10^4 hm^2，年出口量超过100×10^4 t[1]。新疆加工番茄种植受水资源短缺和肥料不合理使用的影响，开始出现产量减少、品质下降[2]等问题。为保障番茄产业的健康持续发展，众多学者针对上述问题，进行了大量的研究。主要集中在以下两方面，一方面是通过设置不同灌溉定额、灌溉频次、施肥量，来探究其对作物产量、品质及水肥利用效率的影响，以期得到合理的灌溉施肥策略[3-8]。如王振华等[8]通过主成分分析探究了不同水肥气组合试验下加工番茄的产量及水肥利用效率，得出灌水量4050 m^3·hm^{-2}，施氮量250 kg·hm^{-2}时，有利于加工番茄水肥利用率的提高。邢英英等[5]也通过水肥耦合试验，利用多目标寻优的方法，得出灌水施肥区间为198~208 mm和442~480 kg·hm^{-2}时，番茄的产量和水肥利用效率最大。另一方面，也有学者通过对灌溉水本身进行处理，如增氧、去电子、磁化等，研究灌溉水活化后对作物产量品质及水肥利用率的影响[9-11]。如张健利等[7]探究了不同灌溉定额与加气方式互作对加工番茄耗水及生长特性的影响，提出了适宜北疆滴灌加工番茄的最佳水气组合模式。张莹莹等[9]的研究也表明，磁化水滴灌有利于作物水分利用效率的提高。

磁化水灌溉技术作为一种新型的先进农业灌溉技术，因其可持续、不破坏环境等特点受到众多学者的青睐[12-14]。目前，国内外学者对磁化水灌溉

收稿日期：2023-05-25；　**修订日期：**2023-08-20
基金项目：国家自然科学基金项目（52269016）；兵团节水灌溉试验计划项目（BTJSSY-202307）
作者简介：马怡璠（1997-），女，硕士研究生，主要从事节水灌溉技术研究. E-mail: 869846674@qq.com
通讯作者：吕德生. E-mail: 13899536225@163.com

的研究多集中于对土壤水盐运移、作物养分吸收、种子萌发及作物生理生长的影响等。例如，以王全九为代表的许多学者，通过室内土柱试验和田间试验，发现磁化水灌溉可以提高土壤持水性，降低土壤盐分，增强土壤养分离子的溶解性，但可能会造成土壤中氮素含量的流失，降低肥料利用率，影响作物的生长[15-17]。此外，张莹莹等[9]的研究发现，磁化水强度为1600~2400 Gs范围内，可以将小麦种子生长提前，并提升其品质和营养价值；但当磁场强度超过3600 Gs时，这种促进效果会明显减弱。周振鹏等[10]的田间试验也表明，磁化水强度大于3000 Gs时，会降低加工番茄的糖酸比和维C。但关于磁化水滴灌对作物水肥利用效率的研究相对较少。此外氮肥的科学施用也是保证加工番茄增产提质的重要手段。众多研究表明，合理施用氮肥可以促进加工番茄茎粗和株高的生长，超出一定范围后，则会抑制加工番茄根系生长，使作物产生抗逆危害，造成减产，会加剧土壤氮素流失，危害环境，造成肥料浪费等现象[3,18-19]。因此，科学控释氮肥，有利于加工番茄产量和品质的提升。

综上，关于磁化水滴灌和施氮量耦合对加工番茄生长的影响研究较少[20-23]，且进一步探究磁氮耦合对作物水肥利用效率的影响有利于磁化水灌溉技术的推广应用，并对保障加工番茄产业的持续发展具有重要的现实意义，故急需开展磁氮耦合对膜下滴灌加工番茄水肥利用效率的研究。因此本研究通过设置不同磁化水强度和施氮量的组合去探究磁化水强度和施氮量对加工番茄生长、产量及水肥利用效率的影响，以期为新疆地区磁化水滴灌加工番茄提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于2022年5—9月在石河子大学节水灌溉试验站进行(44°18′28″N，86°01′47″E，海拔为450.8 m)，处于天山北麓中段，温带大陆性气候，年均降雨量约为203 mm，年均蒸发量约为1689 mm，年均日照时数约为2846 h，无霜期约为173 d。土壤性质属中壤土，0~60 cm土层土壤容重为1.52 g·cm^{-3}。2022年加工番茄生育期内逐日气温和降雨见图1。

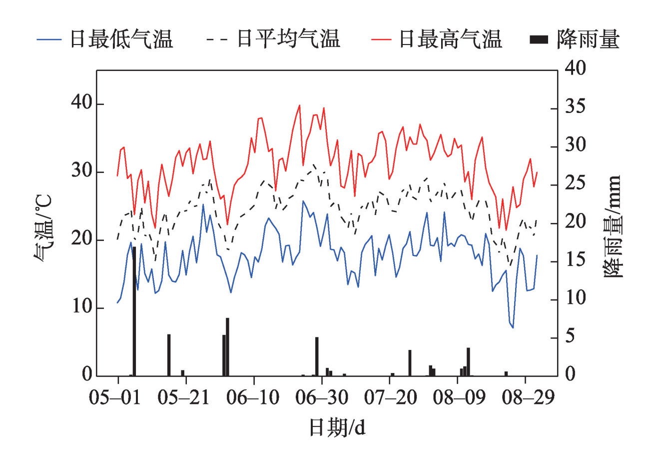


图1 2022年新疆加工番茄生育期逐日降雨量和气温

Fig. 1 Daily rainfall and temperature during the growth period of processed tomato in Xinjiang in 2022

1.2 试验设计

加工番茄品种为“金番3166”，采用“一膜两管四行”的种植模式(膜宽1.45 m，行距30 cm，株距35 cm)，5月初移苗，8月底采摘测产。磁化器由包头鑫达磁性材料厂生产，永磁体由烧结汝铁硼制成，磁化器按N至S极垂直切割水流方向连接于主管与支管接口处，磁化器磁场强度由HT20型数字特斯拉计进行校对。本试验设置4个磁化水强度，分别为0 Gs(M0)、2000 Gs(M1)、3000 Gs(M2)、4000 Gs(M3)和3个施氮水平200 kg N·hm^{-2}(N1)、250 kg N·hm^{-2}(N2)和300 kg N·hm^{-2}(N3)，采用裂区试验设计，共12个处理，每处理重复3次，每小区40 m^2。参照前人研究[4]及当地生产实践，灌溉定额为4500 m^3·hm^{-2}，氮肥选用尿素，磷钾肥均为磷酸二氢钾360 kg·hm^{-2}，随水滴施，加工番茄生育期内灌溉施肥制度见表1。加工番茄生育期内的田间管理措施均与当地生产实践保持一致。

表1 加工番茄生育期的灌溉制度

Tab. 1 Irrigation and fertilization program during tomatoes growth period

生育期	日期	持续时间/d	灌水与施肥比例/%	灌水与施肥次数/次
苗期	05-05—06-10	28	12.5	1
花期	06-02—06-20	19	12.5	1
果实膨大一期	06-21—07-15	25	25	2
果实膨大二期	07-15—08-04	20	25	2
成熟期	08-05—08-25	21	25	1
全生育期	05-05—08-25	113	100	7

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤质量含水率　在加工番茄果实膨大期，灌水后48 h用土钻采集土壤样品，取样位置在滴灌带下，测量深度为60 cm，间隔10 cm。并采用烘干法测定各层土壤质量含水率，以20 cm为一层求得平均土壤含水率，进而计算出加工番茄根层0~60 cm的土壤储水量，公式如下：

$$W = \gamma_i \times H_i \times \theta_i \times 10 \quad (1)$$

式中：W为0~60 cm土层土壤储水量（mm）；γ_i为i层土壤容重（g·cm^{-3}）；H_i为i层土层厚度（cm），本研究中H=10 cm；θ_i为i层土壤含水率（%）。

1.3.2 株高、茎粗和地上生物量　于加工番茄果实膨大期，每个处理随机选择3株长势基本一致的植株利用卷尺和游标卡尺测量其株高和底部地上2 cm处的茎粗值；同时在各小区取具有代表性的加工番茄植株样品3株，分为茎、叶、果三部分，并在烘箱中以105 ℃杀青60 min，随后调至75 ℃烘干至恒重，得各处理的地上部生物量。

1.3.3 产量、水分利用效率及氮肥偏生产力

（1）产量（Y）的测定：于加工番茄成熟期，对每个处理各小区的加工番茄全部统一采摘，分别测其质量并计算产量，包括单果质量和单株结果数。

（2）不同生育时期内加工番茄的耗水量（ET）采用水量平衡法计算，公式如下：

$$ET = Ir + Pr + U - D + (W_1 - W_2) \quad (2)$$

式中：Ir为加工番茄生育期灌水总量（mm）；Pr为生育期降雨总量（mm）；U为地下水的补给量（mm）；D为土壤深层渗漏量（mm）；W_1、W_2为加工番茄移栽前和收获后根层0~60 cm的土壤储水量（mm）。本研究中试验区的地下水位大于5 m，故U取0；由于本试验采用膜下滴灌且灌水定额较小，可以忽略每次灌水产生的深层渗漏，故D取0。

（3）加工番茄水分利用效率（WUE）计算公式如下：

$$\mathrm{WUE} = Y/ET \quad (3)$$

式中：WUE为加工番茄水分利用效率（kg·m^{-3}）；Y为番茄产量（kg·hm^{-2}）。

（4）氮肥偏生产力（NPFP）计算公式如下：

$$\mathrm{NPFP} = Y/N \quad (4)$$

式中：NPFP为氮肥偏生产力（kg·kg^{-1}）；N为投入的纯氮总质量（kg·hm^{-2}）。

1.4 数据处理与统计分析

1.4.1 空间分析　空间分析是多目标优化分析方法的一种，通过将多元回归得到的空间曲面进行平面投影，探求各指标可接受区域的重叠区，从而得到满足各指标的最佳组合范围。本研究中，因各目标的量纲不同，故在多元回归之后，对数据进行了归一化处理，最后进行空间分析，得到了满足产量和水肥利用效率的磁氮组合范围。

1.4.2 统计分析　使用Excel 2020对试验中各指标数据进行整理和计算，运用SPSS 26.0进行方差分析和显著性检验，使用Origin 2022进行多元回归分析和空间分析。

2 结果与分析

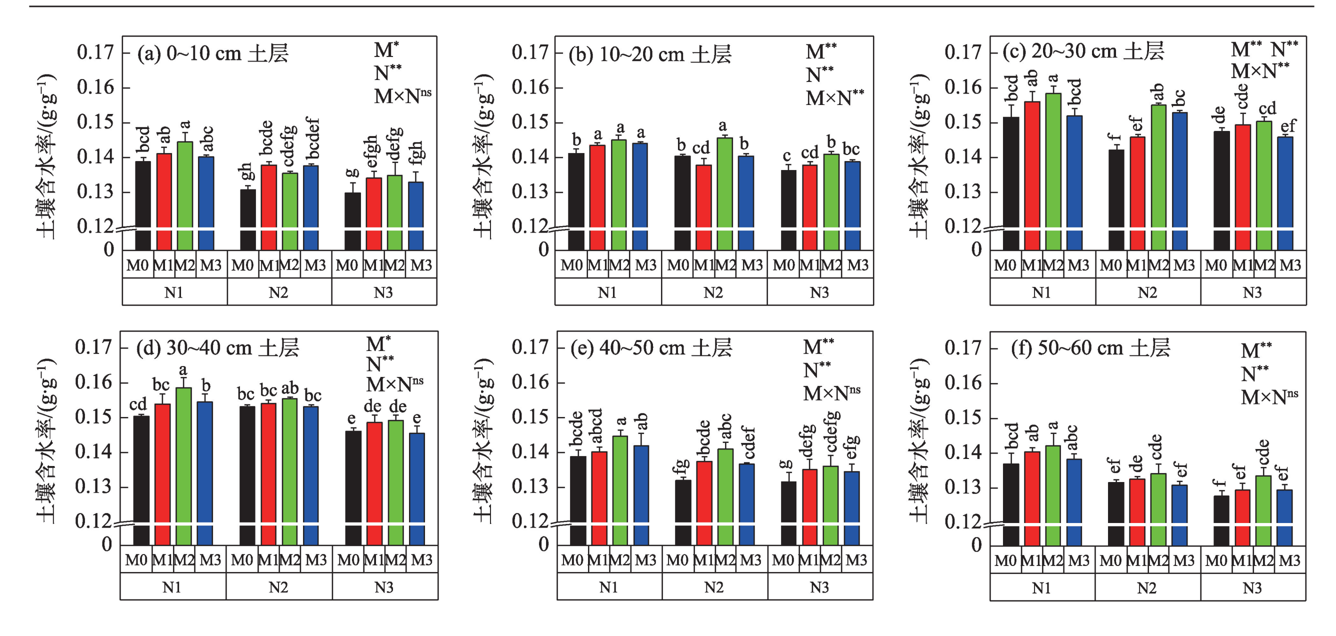
2.1 不同磁氮组合处理对土壤含水率的影响

不同磁氮组合处理下的加工番茄平均土壤质量含水率如图2所示。由图可知，磁化水强度对土壤含水率的提升效果表现为：M2>M1>M3>M0，土壤含水率随施氮量增加而减少，且在20~40 cm土层含水率达到峰值。

由图2知，在各土层中，同一施氮强度下，随磁化强度的增加，土壤含水率呈先增加后减小的变化趋势。土壤含水率在0~20 cm土层由12.97%~14.45%增加到13.62%~14.58%（图2a，图2b）；后以0.06%~0.13%的速率在20~30 cm土层递增至14.22%~15.85%（图2c）。土壤含水率在40~50 cm土层由14.55%~15.87%减少到13.15%~14.48%（图2d，图2e）；后以0.03%~0.04%的速率在50~60 cm土层递增至12.77%~14.21%（图2f）。施氮量的增加，随土壤含水率基本呈下降态势。综上可知，磁化水强度对土壤含水率的提升效果表现为：M2>M1>M3>M0。

双因素方差分析显示，磁化水强度、施氮量均显著影响着土壤含水率、土壤储水量。而磁氮耦合作用的显著性呈现差异性，具体表现为：20~40 cm土层土壤含水率受磁氮耦合作用显著（P<0.05）；其余土层交互作用影响不显著（P>0.05）；磁氮耦合作用对土壤储水量的影响不显著。0~60 cm的土壤储水量也受磁化水强度和施氮量的影响显著（P<0.05）（图2d），但磁氮耦合作用对土壤储水量的影响不显著（P>0.05）。

综上可知，磁化水滴灌提高了各土层土壤质量



注：图中不同的小写字母代表处理间差异显著(P<0.05)，M表示处理中不同的磁化水强度，N表示处理中的施氮量水平。

图2 磁氮组合试验下加工番茄各土层平均土壤质量含水率

Fig. 2 Average soil moisture of each soil layer under magnetic nitrogen combined test

含水率，而磁氮耦合作用主要促进了20~40 cm土层土壤含水率的增加，总体上磁化水滴灌提高了加工番茄根层土壤储水量。

2.2 不同磁氮组合处理对加工番茄生长的影响

不同磁化水强度和施氮量组合处理下的加工番茄株高、茎粗和各部分地上部生物量如表2所示。由表2可知，磁化水强度和施氮量均会对加工番茄的生长产生显著影响(P<0.01)，且二者具有耦合效应，主要体现在加工番茄的株高和叶片干物质量的影响。各磁化强度下，施氮量的增加均促进了加工番茄株高和茎粗的生长，提高了地上部生物量的积累。加工番茄株高在磁化强度0~2000 Gs范围

表2 磁氮组合试验下加工番茄的株高、茎粗和地上部生物量

Tab. 2 Plant height, stem diameter, and aboveground biomass of tomatoes under different magnetic-nitrogen combined test

处理		株高/cm	茎粗/mm	地上部生物量		
				茎/(g·株⁻¹)	叶/(g·株⁻¹)	果/(g·株⁻¹)
N1	M0	52.71±2.71h	15.43±0.32g	61.60±1.16g	65.86±0.79h	128.77±1.62g
	M1	56.43±1.36g	15.86±0.37fg	62.21±1.19g	66.25±0.63gh	130.41±1.09fg
	M2	61.34±0.82ef	16.44±0.22def	67.13±0.53cd	70.74±0.64e	136.56±0.63cd
	M3	64.50±0.59de	16.54±0.41def	65.33±1.2def	69.24±1.01ef	134.62±1.18de
N2	M0	60.34±0.96f	16.28±0.44ef	63.42±0.8fg	67.77±0.99fg	131.53±0.97f
	M1	63.31±0.93def	16.64±0.32cde	63.67±1.58fg	68.89±0.63f	132.60±0.72ef
	M2	69.48±1.16bc	17.26±0.33bc	69.33±0.95ab	75.60±0.39bc	139.26±1.21b
	M3	66.12±1.22cd	16.93±0.12bcde	67.39±0.71bcd	74.28±0.89cd	137.79±1.08bc
N3	M0	64.76±1.8de	16.81±0.21cde	64.62±0.92ef	70.92±0.69e	134.48±1.51de
	M1	71.03±2.78b	17.57±0.26ab	66.28±0.59de	73.42±0.77d	137.79±0.38bc
	M2	75.06±1.86a	18.18±0.35a	71.36±0.91a	78.59±0.54a	144.88±1.11a
	M3	68.55±0.55bc	17.13±0.13bcd	68.90±0.77bc	76.11±1.26b	140.19±1.38b
F值检验	N	99.895**	39.221**	28.576**	141.643**	72.512**
	M	39.409**	13.847**	48.880**	93.084**	71.098**
	N×M	5.000**	1.605ns	0.268ns	2.648*	1.184ns

注：N1、N2、N3代表处理的施氮量为200 kg·hm⁻²、250 kg·hm⁻²和300 kg·hm⁻²，M0、M1、M2、M3代表磁化水强度为0 Gs、2000 Gs、3000 Gs、4000 Gs。表中同列中小写字母表示处理在P<0.05水平上存在显著性差异；*也表示处理在P<0.05水平上存在显著性差异，**表示在P<0.01水平上存在显著性差异，ns表示在P<0.05水平上无显著性差异，下同。

内,由52.71~64.77 cm增加至56.43~71.03 cm,后以5.69%~9.74%的速率在磁化强度3000 Gs范围内递增至61.34~75.05 cm,之后以4.83%~8.67%的速率在磁化强度4000 Gs范围内递减至64.50~68.56 cm。加工番茄茎粗在磁化强度0~2000 Gs范围内,由15.43~16.81 cm增加至15.86~17.57 cm,后以3.46%~3.74%的速率在磁化强度3000 Gs范围内递增至16.44~18.18 cm,之后以1.88%~5.77%的速率在磁化强度4000 Gs范围内递减至16.54~17.13 cm。加工番茄地上部分生物量在磁化强度0~2000 Gs范围内,由256.22~270.03 g·株$^{-1}$增加至258.87~277.50 g·株$^{-1}$,后以6.01%~7.18%的速率在磁化强度3000 Gs范围内递增至274.43~294.83 g·株$^{-1}$,之后以1.66%~3.27%的速率在磁化强度4000 Gs范围内递减至269.19~285.20 cm。

不同施氮水平下,磁化水强度对加工番茄株高、茎粗和地上部生物量影响各不相同。N1水平时,磁化处理下的株高较未磁化处理的株高显著增加了7.05%~22.36%;N2水平时,磁化处理下的株高较未磁化处理的株高显著增加了9.57%~15.14%;N3水平时,磁化水处理下的株高均较未磁化处理显著1.90%~9.68%。各施氮水平下,随磁化强度的增加,茎粗均增大,但增大幅度略有差异。其中,N1水平时,M1磁化水强度下的加工番茄茎粗较M0无显著性差异,M2和M3磁化水强度下的加工番茄茎粗较M0分别显著增加了6.54%和3.99%;N2水平时,M1和M3磁化水强度下的茎粗较M0无显著性差异,M2磁化水强度下的茎粗较M0显著增加了6.02%;N3水平时,M1和M2磁化水强度下的茎粗较M0显著增加了4.52%和8.14%,M3磁化水强度下的茎粗较M0无显著性差异。N1和N2水平时,M1磁化水强度下的地上部生物量较M0无显著性差异,M2和M3磁化水强度下的地上部生物量较M0分别显著增加了6.02%~6.55%和3.99%~7.19%;N3水平时,M1、M2和M3磁化水强度下的地上部生物量均较M0分别显著增加了3.52%、10.81%和7.31%。

综上可知,磁化水强度对加工番茄生长的促进效果表现为M2>M1>M3>M0,但随施氮量的增加,同一磁化水强度对加工番茄生长的促进效果提升不明显。

2.3 不同磁氮组合处理对加工番茄产量及水肥利用效率的影响

不同磁化水强度和施氮量组合处理下的加工番茄单果质量、单株结果数和产量及水肥利用效率如表3所示。磁化强度对加工番茄Y、WUE和NPFP的提升效果表现为M2>M1>M3>M0,施氮量增加,会提高加工番茄的Y和WUE,但会降低NPFP。

不同施氮水平下,各磁化水强度对加工番茄Y、

表3 磁氮组合试验下加工番茄产量构成及水肥利用效率

Tab. 3 Yield component and water and fertilizer utilization efficiency of tomatoes under different magnetic-nitrogen combined test

处理		单果质量/g	单株结果数/个	产量/(t·hm^{-2})	水分利用效率/(kg·m^{-3})	氮肥偏生产力/(kg·kg^{-1})
N1	M0	52.71±2.71h	54.7±2.3a	151.30±0.24f	33.52±0.13d	756.51±1.18g
	M1	52.17±1.33cd	56.4±1.5a	159.12±0.14d	33.30±0.06c	795.62±0.71g
	M2	53.47±1.94bcd	58.5±2.8a	164.51±0.86c	34.36±0.13f	822.54±4.31a
	M3	54.70±1.28bcd	56.9±2.0a	156.53±0.40e	34.70±0.11de	782.66±1.98c
N2	M0	52.51±2.13cd	57.2±2.1a	158.56±0.46d	34.52±0.08ef	634.24±1.84g
	M1	53.73±1.68bcd	57.0±2.4a	164.70±0.37c	35.13±0.13bc	658.80±1.49f
	M2	57.43±1.22ab	55.3±1.6a	166.24±1.54b	35.32±0.30ab	664.94±6.15e
	M3	56.08±1.73bc	55.9±1.9a	163.80±0.53c	35.50±0.05a	655.19±2.10f
N3	M0	54.63±1.73bcd	56.8±2.5a	164.07±0.69c	34.39±0.16f	546.89±2.31j
	M1	54.48±2.43bcd	57.6±3.4a	167.04±0.39b	34.93±0.15cd	556.81±1.30i
	M2	60.71±2.34a	53.3±2.3a	169.67±0.65a	35.61±0.20a	565.57±2.18h
	M3	57.50±1.21ab	54.7±1.9a	167.01±0.47b	34.89±0.07cd	556.70±1.55i
F值检验	N	9.983**	0.388^{ns}	382.830**	135.731**	15201.977**
	M	8.527**	0.377^{ns}	183.528**	60.161**	211.641**
	N×M	0.850^{ns}	1.148^{ns}	14.746**	12.112**	31.768**

WUE和NPFP影响均有不同。N1水平时，M1、M2、M3磁化水强度下单果质量均较M0显著增加1.75%、4.29%、6.70%；N2水平时，M1和M3磁化水强度下单果质量较M0无显著性差异，M2磁化水强度下单果质量较M0显著提高了9.36%；N3水平时，仅M2磁化水强度下单果质量较M0显著增加了11.43%，M1和M3磁化水强度下均较M0差异不显著。

各处理的单株结果数均无显著性差异，双因素方差分析结果也显示施氮量和磁化水强度对加工番茄单株结果数无显著性影响。各施氮水平下，随磁化水强度的增加，加工番茄*Y*呈先增加后减小的变化，处理间差异显著(P<0.05)。N1、N2和N3水平时，M1、M2和M3磁化水强度下*Y*较M0显著增加了1.81%~5.16%、3.41%~8.73%和1.79%~3.45%。各处理下的WUE和PFP与*Y*变化规律相似，均随磁化强度的增加，呈先增加后减小的变化；相同磁化水强度下，随施氮量的增加，WUE呈逐渐增加的变化，NPFP呈逐渐减小的趋势。N1水平时，M1磁化水强度下的WUE较M0显著降低了0.65%，M2磁化水强度下的WUE较M0显著提高了2.50%，M3磁化水强度下的WUE较M0无显著性差异；N2和N3水平时，M1、M2、M3磁化水强度下的WUE较M0分别提高了1.57%~1.76%、2.31%~3.54%和1.45%~2.83%。N1、N2和N3水平时，M1、M2和M3磁化水强度下的NPFP较M0显著增加了3.45%~8.72%、3.30%~4.84%和1.79%~3.41%。

由于加工番茄*Y*、WUE和NPFP受到磁化水强度和施氮量的双因素影响，故以磁化水强度M和施氮量N为自变量，*Y*、WUE和NPFP为因变量，对其进行回归分析，结果如图3所示。由图3可知，回归方程对加工番茄*Y*、WUE和NPFP的决定系数均在0.8以上，方程回归效果较好，但三者量纲不同。为寻找对加工番茄生长最适宜的磁氮组合，首先对各处

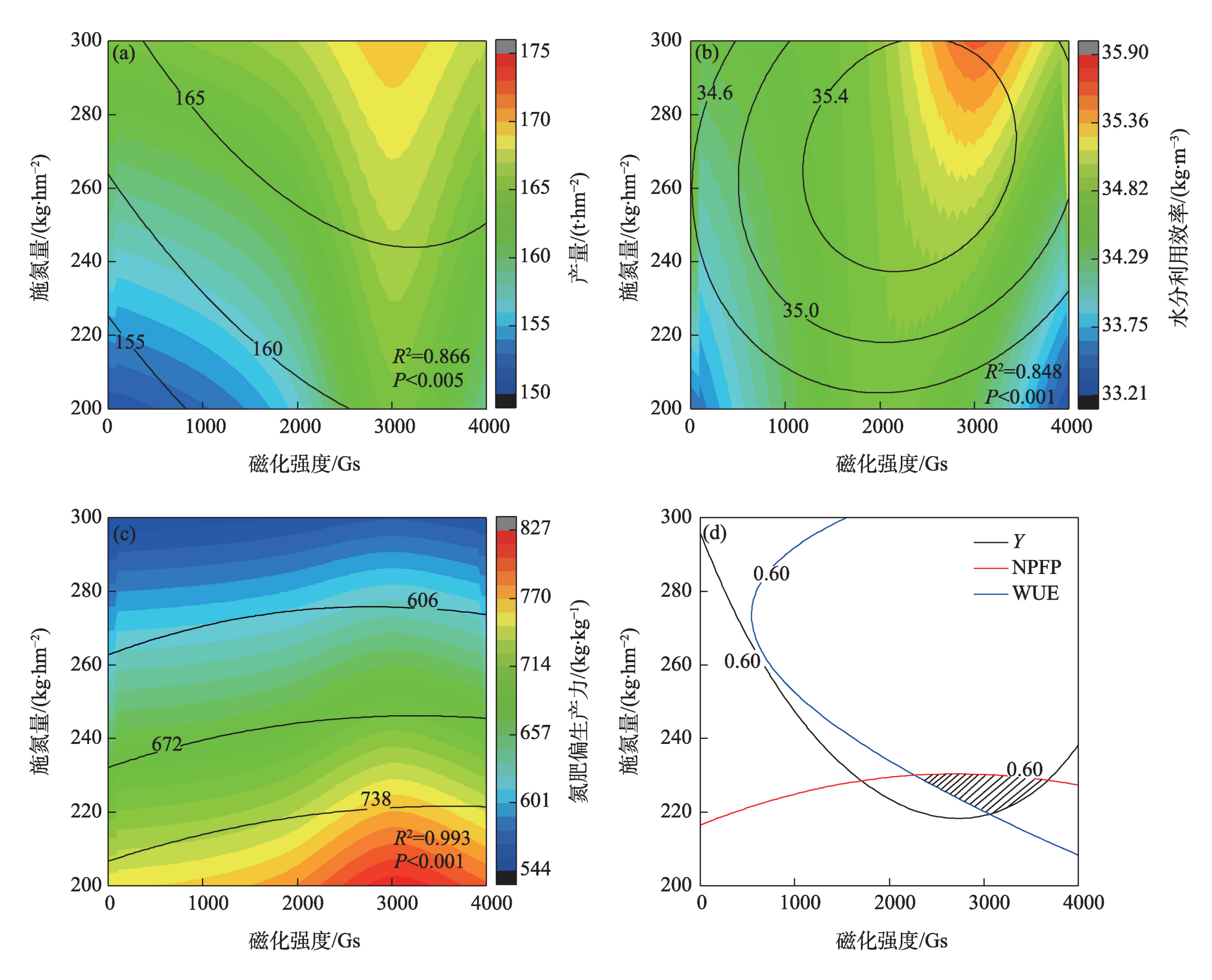


图3 加工番茄产量、水分利用效率和氮肥偏生产力的回归分析(a~c)及空间分析(d)

Fig. 3 Regression analysis diagram (a~c) and spatial analysis diagram (d) of yield, water use efficiency and partial productivity of nitrogen-fertilizer of tomato

理的 Y、WUE 和 NPFP 进行归一化处理，再运用空间分析的方法去探寻出同时使得加工番茄 Y、WUE 和 NPFP 取得较大值时磁化水强度和施氮量的合理范围，结果如图 3d 所示。由图 3d 可知，Y、WUE 和 NPFP 取得较大值时的磁化水强度为 2270~3678 Gs，相应的施氮量为 220~230 kg·hm^{-2}。

3 讨论

本研究表明，磁化处理增加了土壤含水率，增加施氮量会降低土壤含水率，磁氮耦合对 10~30 cm 土层的土壤含水率影响最大，这与前人研究结果相似。Zhou 等[24]研究表明，磁化处理减小了水分子间的作用力，降低了水分子间黏度，导致水分在土壤中的流动速度减小，从而提升了土壤的持水能力，增加了土壤的保水性，提高了土壤的含水率。施氮量的增加，为加工番茄的生长提供了更多的氮素营养，使加工番茄根系吸水增强，提高了作物对养分的吸收，促进其生长，导致耗水增加，土壤含水率下降[11,25]。李佳蓓等[26]通过室内模拟试验研究，发现磁化水和氮肥溶液均会显著提高土壤的入渗能力，从而使土壤含水率增大，且二者耦合效果显著。这和本研究结果基本相同，但本研究中，磁氮耦合对表层土壤（0~10 cm）和深层土壤（30~60 cm）的影响效果不显著。这可能是由于大田试验过程中，土壤性质（土壤容重、土壤导水性、土壤结构等）不同所致[27-29]。

本研究表明，磁化水强度和施氮量均对加工番茄的生长影响显著（P<0.05），随磁化强度的增加呈先增后减的变化，随施氮量增加呈增加趋势，且磁氮耦合对加工番茄株高的影响显著（P<0.05）。李夏等[30]研究发现，磁化水灌溉影响了土壤对作物的氮素供应，提高了土壤氮素的矿化能力，能促进作物根系对土壤中氮素含量的吸收，增加作物器官中的氮含量。水经过不同强度的磁场，其磁电性质和化学性质改变程度不同，进而对土壤环境的影响不同，这可能是造成不同磁化水强度下加工番茄生长效果不同的原因[31]。韦业等[32]通过盆栽试验探究了磁化水和施氮处理在不同组合下对葡萄生长的影响，结果表明磁化施氮处理可以提高作物的光合能力，优化葡萄的生物量分配，促进作物的生长，这与本研究结果相似。由于加工番茄的株高对土壤环境的改变相较于其他生长指标感知更灵敏，所以磁氮耦合对株高影响显著（P<0.05）。

本研究表明，施氮水平相同时，磁化强度的增加使加工番茄的产量呈先增后减的变化趋势；经磁化处理的水分利用效率较未磁化处理有显著提高（P<0.05）；氮肥偏生产力随施氮量的增加呈减小趋势，随磁化强度的增加呈现先增后减的趋势。通过对加工番茄产量、水分利用效率和氮肥偏生产力的综合分析，得出当施氮量为 220~230 kg·hm^{-2}、磁化水强度为 2800~3600 Gs 时，三者同时取得较大值。磁氮耦合改变了土壤的含水率和土壤养分的有效性，影响了加工番茄的产量、水分利用效率和氮肥偏生产力。周振鹏等[10]运用主成分分析的方法探究了膜磁组合对加工番茄生长及产量的影响，表明 3000 Gs 磁化水滴灌可以显著提升加工番茄品质并增加其产量，这与本研究结果基本一致。磁化水滴灌在一段时间内使土壤水分能够保持在一个较高的水平，满足了作物的根系吸水，减少了土壤水分的流失，使得作物耗水减小，从而保证了土壤水分的有效性，进而使作物的水分利用效率得到提升。邢英英等[5]通过探究水肥组合对温室番茄生长及水肥利用效率的影响，证明适宜的水肥组合可以提高番茄的水肥利用效率，过高或过低的施肥水平均会降低番茄的水肥利用效率，这与本研究结果基本一致。本研究中氮肥偏生产力的下降可能是由于磁化水提高土壤的持水能力，使部分氮肥流失[33-34]。本研究仅用一年试验数据探求了基于产量、水分利用效率和氮肥偏生产力取得较大值时的磁氮区间，并未进行年际间的重复，故可靠性仍需验证，有待进一步研究。

4 结论

磁化水滴灌下合理配施氮肥，能够改变水分子的物化性质，改善作物根区的土壤环境，从而促进作物的生长，提高水肥利用效率。本文通过对不同磁氮组合试验下加工番茄生长和水肥利用效率的研究，得出以下结论：

（1）磁氮耦合提高了土壤含水率，为加工番茄生长创造了更好的土壤水分条件。各土层土壤含水率受单因素（磁化水强度、施氮量）影响显著，耦合效应对 20~40 cm 土层土壤含水率影响显著（P<

0.05)。土壤含水率的提高使得土壤储水量增加,为加工番茄的生长和水肥利用效率的提高奠定了基础。

(2)不同的磁氮组合均促进了加工番茄的生长。磁化水滴灌下,加工番茄的株高、茎粗、地上生物量较未磁化处理提高了4.92%~16.37%、1.90%~8.15%、0.93%~9.19%,合理配施氮肥,可以提高磁化水滴灌对作物生长的促进效果。磁氮耦合能显著提高加工番茄产量、水分利用效率和氮肥偏生产力。M2N3处理的产量最大;M3N2处理和M2N3处理的水分利用效率最大,M2N1处理的氮肥偏生产力最大。

(3)通过对磁氮组合下的加工番茄产量、水分利用效率和氮肥偏生产力进行回归分析和空间分析,得到磁化水强度在2270~3678 Gs,同时施氮量为220~230 $kg \cdot hm^{-2}$时,三者可以取得各自最大值的60%~70%,使用该范围的磁氮组合,可以提高加工番茄的产量和水肥利用效率。

参考文献(References):

[1] 李荣霞, 刘磊, 刘伟, 等. 新疆加工番茄种植现状、问题及建议[J]. 中国蔬菜, 2022, 42(4): 4-8. [Li Rongxia, Liu Lei, Liu Wei, et al. Current situation, problems and suggestions of processing tomato cultivation in Xinjiang[J]. China Vegetables, 2022, 42(4): 4-8.]

[2] 李建明, 潘铜华, 王玲慧, 等. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 82-90. [Li Jianming, Pan Tonghua, Wang Linghui, et al. Effects of water and fertilizer coupling on photosynthesis, yield and water use efficiency of tomato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(10): 82-90.]

[3] 张康, 聂志刚, 王钧, 等. 温度升高下降水和施氮对旱地春小麦产量和生物量影响的模拟与分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1966-1975. [Zhang Kang, Nie Zhigang, Wang Jun, et al. Simulation and analysis of effects of temperature increase and decrease of water and nitrogen application on yield and biomass of spring wheat in dry land[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1966-1975.]

[4] 陈潇洁. 水肥气耦合对滴灌加工番茄耗水及品质的影响研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2021: 66. [Chen Xiaojie. Effects of Water, Fertilizer and Air Coupling on Water Consumption and Quality of Tomato Processed by Drip Irrigation[D]. Shihezi: Shihezi University, 2021: 66.]

[5] 邢英英, 张富仓, 吴立峰, 等. 基于番茄产量品质水肥利用效率确定适宜滴灌灌水施肥量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S1): 110-121. [Xing Yingying, Zhang Fucang, Wu Lifeng, et al. Determination of suitable fertilizer application amount of drip irrigation water based on yield and quality of tomato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(S1): 110-121.]

[6] 丛鑫, 张立志, 徐征和, 等. 水氮互作对冬小麦水肥利用效率与经济效益的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 315-324. [Cong Xin, Zhang Lizhi, Xu Zhenghe, et al. Effects of water and nitrogen interaction on water and fertilizer utilization efficiency and economic benefit of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 315-324.]

[7] 张健利, 王振华, 陈潇杰, 等. 不同加气方式和灌水量对滴灌加工番茄耗水及生长的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(11): 1451-1461. [Zhang Jianli, Wang Zhenhua, Chen Xiaojie, et al. Effects of different aeration methods and irrigation amount on water consumption and growth of tomato processed by drip irrigation[J]. Journal of Northwest Agricultural Sciences, 2022, 31(11): 1451-1461.]

[8] 王振华, 陈潇洁, 吕德生, 等. 水肥耦合对加气滴灌加工番茄产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 66-75. [Wang Zhenhua, Chen Xiaojie, Lv Desheng, et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield and quality of tomato processed by aerated drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 66-75.]

[9] 张莹莹, 宋妮, 单志杰, 等. 磁化水灌溉对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(6): 60-66. [Zhang Yingying, Song Ni, Shan Zhijie, et al. Effects of magnetized water irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(6): 60-66.]

[10] 周振鹏, 王振华, 叶含春, 等. 降解膜覆盖和磁化水滴灌对加工番茄土壤水分、产量和品质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(10): 201-208. [Zhou Zhenpeng, Wang Zhenhua, Ye Hanchun, et al. Effects of degradable film mulching and magnetized water drip irrigation on soil moisture, yield and quality of processed tomato[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(10): 201-208.]

[11] 朱练峰, 张均华, 禹盛苗, 等. 磁化水灌溉促进水稻生长发育提高产量和品质[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 107-114. [Zhu Lianfeng, Zhang Junhua, Yu Shengmiao, et al. Magnetized water irrigation promotes rice growth and development to improve yield and quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(19): 107-114.]

[12] 丁振瑞, 赵亚军, 陈凤玲, 等. 磁化水的磁化机理研究[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 432- 439. [Ding Zhenrui, Zhao Yajun, Chen Fengling, et al. Research on magnetization mechanism of magnetized Water[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 432-439.]

[13] Khoshravesh M, Mostafazadeh-Fard B, Mousavi S F, et al. Effects of magnetized water on the distri-bution pattern of soil water with respect to time in trickle irrigation[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(4): 515-522.

[14] Khoshravesh Miangoleh M, Kiani A R. Effect of magnetized water on infiltration capacity of different soil textures[J]. Soil Use and Management, 2014, 30(4): 588-594.
[15] 王全九, 解江博, 张继红, 等. 磁场强度对磁化水入渗和土壤水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 292-298. [Wang Quanjiu, Xie Jiangbo, Zhang Jihong, et al. Effects of magnetic field intensity on magnetized water infiltration and soil water and salt transport characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 292-298.]
[16] 朱红, 孔令刚, 张志浩, 等. 磁化处理促进施氮条件下葡萄氮素的代谢和分布[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(4): 535-544. [Zhu Hong, Kong Linggang, Zhang Zhihao, et al. Magnetization promotes nitrogen metabolism and distribution in grape under nitrogen application conditions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4): 535-544.]
[17] 戎鑫, 李建军, 但宏兵, 等. 磁化水的特性、机理及应用研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(9): 65-71. [Rong Xin, Li Jianjun, Dan Hongbing, et al. Research progress on properties, mechanism and application of magnetized water[J]. Materials Review, 2022, 36(9): 65-71.]
[18] 漆栋良, 胡田田, 宋雪. 适宜灌水施氮方式提高制种玉米产量及水氮利用效率[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 98-104. [Qi Dongliang, Hu Tiantian, Song Xue. Improving yield and water and nitrogen use efficiency of seed maize by suitable irrigation and nitrogen application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 98-104.]
[19] 张恩平, 田悦悦, 李猛, 等. 长期不同施肥对番茄根际土壤微生物功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5027-5036. [Zhang Enping, Tian Yueyue, Li Meng, et al. Effects of long-term fertilization on microbial functional diversity in rhizosphere soil of tomato[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 5027-5036.]
[20] Khoshravesh M, Mostafazadeh-Fard B, Mousavi S F, et al. Effects of magnetized water on the distribution pattern of soil water with respect to time in trickle irrigation[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(4): 515-522.
[21] Al-Ogaidi A A M, Wayayok A, Rowshon M K, et al. The influence of magnetized water on soil water dynamics under drip irrigation systems[J]. Agricultural Water Management, 2017, 180: 70-77.
[22] Guo Y, Wang Q, Zhao X, et al. Field irrigation using magnetized brackish water affects the growth and water consumption of *Haloxylon ammodendron* seedlings in an arid area[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 929021.
[23] Mostafazadeh-Fard B, Khoshravesh M, Mousavi S F, et al. Effects of magnetized water on soil chemical components underneath trickle irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2012, 138(12): 1075-1081.
[24] Zhou B, Yang L, Chen X, et al. Effect of magnetic water irrigation on the improvement of salinized soil and cotton growth in Xinjiang [J]. Agricultural Water Management, 2021, 248: 106784.
[25] 王全九, 孙燕, 宁松瑞, 等. 活化灌溉水对土壤理化性质和作物生长影响途径剖析[J]. 地球科学进展, 2019, 34(6): 660-670. [Wang Quanjiu, Sun Yan, Ning Songrui, et al. Effects of activated irrigation water on soil physicochemical properties and crop growth [J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(6): 660-670.]
[26] 李佳蓓, 张富仓, 段晨骁, 等. 氮肥溶液磁化灌溉下土壤入渗特征和水氮迁移规律研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 316-324. [Li Jiabei, Zhang Fucang, Duan Chenxiao, et al. Study on soil infiltration characteristics and water and nitrogen migration under magnetized nitrogen fertilizer solution irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 316-324.]
[27] 王全九, 许紫月, 单鱼洋, 等. 磁化微咸水矿化度对土壤水盐运移的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 198-206. [Wang Quanjiu, Xu Ziyue, Shan Yuyang, et al. Effects of salinity of magnetized brackish water on soil water and salt transport[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 198-206.]
[28] 王洪波, 王成福, 吴旭, 等. 磁化水滴灌对土壤盐分及玉米产量品质的影响[J]. 土壤, 2018, 50(4): 762-768. [Wang Hongbo, Wang Chengfu, Wu Xu, et al. Effects of magnetized water drip irrigation on soil salinity and yield and quality of maize[J]. Soil, 2018, 50(4): 762-768.]
[29] 盛统民, 张胜江, 肖兵. 磁化水灌溉对土壤水盐分布和春玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 289-295. [Sheng Tongmin, Zhang Shengjiang, Xiao Bing. Effects of magnetized water irrigation on soil water and salt distribution and spring maize yield [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 289-295.]
[30] 李夏, 乔木, 周生斌. 磁化水滴灌对棉田土壤脱盐效果及棉花产量的影响[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 431-436. [Li Xia, Qiao Mu, Zhou Shengbin. Effects of magnetized water drip irrigation on soil desalination and cotton yield in cotton fields[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 431-436.]
[31] 宁松瑞, 赵雪, 姬美玥, 等. 脱硫石膏和磁化水对盐碱胁迫荞麦光合特性的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 310-317. [Ning Songrui, Zhao Xue, Ji Meiyue, et al. Effects of desulfurized gypsum and magnetized water on photosynthetic characteristics of buckwheat under salt-alkali stress[J]. Chinese Journal of Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 310-317.]
[32] 韦业, 王渌, 朱红, 等. 施氮条件下磁化水灌溉对葡萄生长和光合特性的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(4): 849-859. [Wei Ye, Wang Lu, Zhu Hong, et al. Effects of magnetized water irrigation on grape growth and photosynthetic characteristics under nitrogen application[J]. Journal of Nuclear Agronomy, 2020, 34(4): 849-859.]
[33] 宋良翠, 马维伟, 李广, 等. 水分对尕海湿地退化演替土壤氮矿化的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 165-175. [Song Liangcui, Ma Weiwei, Li Guang, et al. Effects of water on nitrogen mineralization in degraded soil of Gahai Wetland[J]. Arid Zone Re-

search, 2022, 39(1): 165–175.]

[34] 李燕强, 王振华, 叶含春, 等. 灌溉水矿化度对棉田土壤呼吸速率的影响[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 392–402. [Li Yanqiang, Wang Zhenhua, Ye Hanchun, et al. Effects of salinity of irrigation water on soil respiration rate in cotton field[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 392–402.]

Effects of magnetic and nitrogen coupling on the yield and water and fertilizer usage efficiency of processed tomatoes under mulched drip irrigation

MA Yifan[1,2,3], LYU Desheng[1,2,3], WANG Zhenghua[1,2,3], LI Yanqiang[1,2,3],
LIU Jian[1,2,3], WEN Yue[1,2,3], ZHU Yan[1,2,3]

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 3. Key Laboratory of Northwest Oasis Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PR China, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: This study used yield and water and fertilizer usage efficiency as targets to explore a magnetized water fertilization system suitable for tomato processing via drip irrigation under film. Four magnetized water samples with an intensity of 0 Gs (M0), 2000 Gs (M1), 3000 Gs (M2), and 4000 Gs (M3) as well as three nitrogen application levels of 200 kg N·hm^{-2} (N1), 250 kg N·hm^{-2} (N2), and 300 kg N·hm^{-2} (N3) were set up, and a split zone test design was adopted. Field experiments were conducted. By monitoring the soil moisture content, plant height, stem diameter, and above-ground biomass during the growth period of processed tomatoes, combined with the final yield index, the effects of magnetic nitrogen combination on the water and fertilizer usage efficiency of processed tomatoes were explored. The results showed that magnetized water drip irrigation significantly increased soil moisture content and soil water storage. Magnetic nitrogen coupling was also shown to significantly increase the soil moisture content in the 20–40 cm soil layer. When the magnetized water intensity was 2270–3678 Gs and the nitrogen rate was 220–230 kg·hm^{-2}, the growth of processed tomatoes was promoted. However, when the magnetization intensity was greater than 4000 Gs and the nitrogen rate was more than 250 kg·hm^{-2}, the growth of processed tomatoes could not be further improved. As magnetization was increased, the yield and water and fertilizer use efficiency of processed tomatoes increased before decreasing. As the nitrogen application rate was increased, the yield and water use efficiency increased, but the partial productivity of nitrogen fertilizer decreased. Among them, the M2N3 treatment had the highest yield and water use efficiency (169.67 t·hm^{-2} and 35.61 kg·m^{-3}), while the M2N1 treatment had the highest nitrogen partial productivity (822.54 kg·kg^{-1}). Using regression and spatial analyses, the magnetic nitrogen range of yield, water use efficiency, and nitrogen partial productivity was 2270–3678 Gs and 220–230 kg N·hm^{-2}. This study can provide theoretical support for the scientific application of magnetized water and nitrogen fertilizer in tomato processing in Xinjiang and provide scientific guidance for optimizing the magnetic nitrogen combination configuration to improve the yield of tomato processing.

Keywords: mulched drip irrigation; magnetic and nitrogen coupling; yield; water and fertilizer utilization efficiency; spatial analysis; processing tomatoes